交通施設に関わる地震災害とその対策

防災研究所　流域災害研究センター

教授　五十嵐　晃

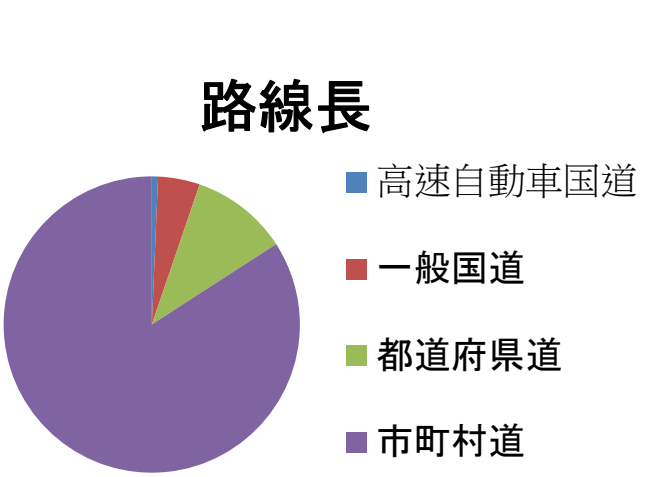
交通施設の特性

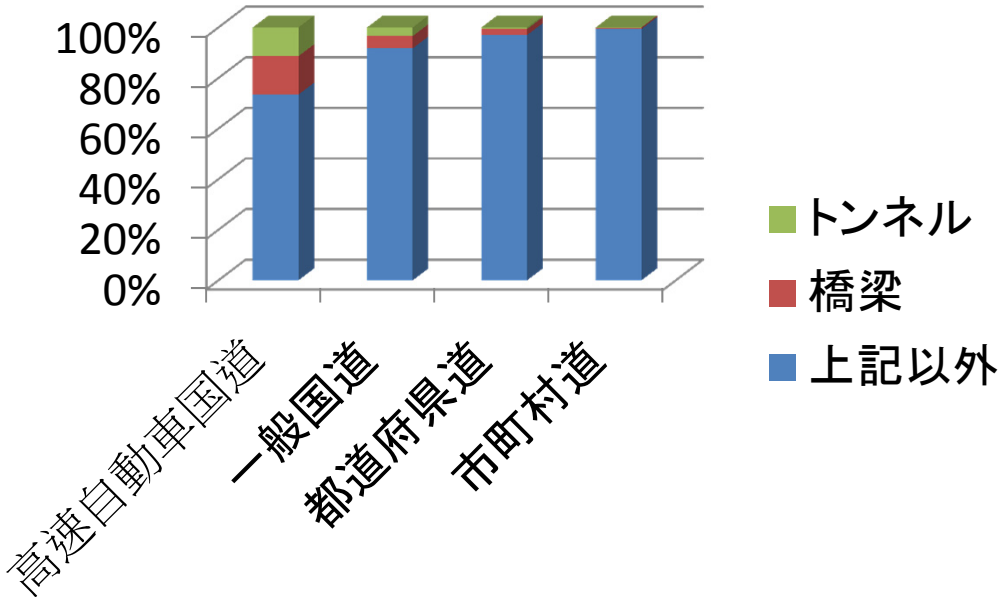
- 道路・鉄道・港湾・空港など
  - 交通と輸送（人や物の空間的移動）を担う
    - 産業・経済活動
  - 災害時の救援、災害支援、復旧活動の基盤
  - 利用者の安全性が重要なファクター
- 道路・鉄道
  - 路線構造物
    - 点とそれらを結ぶ線状の連続空間
  - ネットワーク
  - 階層性
    - 輸送量／速度により高規格～低規格の種別
    - 高規格になるほど路線の地表面での平面交差を避けるための構造を要する
      盛土・橋・地下トンネルなど
  - 相互連関性



道路

種別	路線長 [km]	道路面積 [km²]	橋梁[km]	トンネル[km]
高速自動車国道	8,358.3	191.12	1,268.6	951.1
一般国道	55,432.2	737.04	2,683.9	1,892.8
都道府県道	129,374.9	1,259.51	3,061.6	846.9
市町村道	1,023,962.4	5,369.11	5,914.3	439.9
合計	1,217,127.8	7,556.78	11,659.2	4,130.7

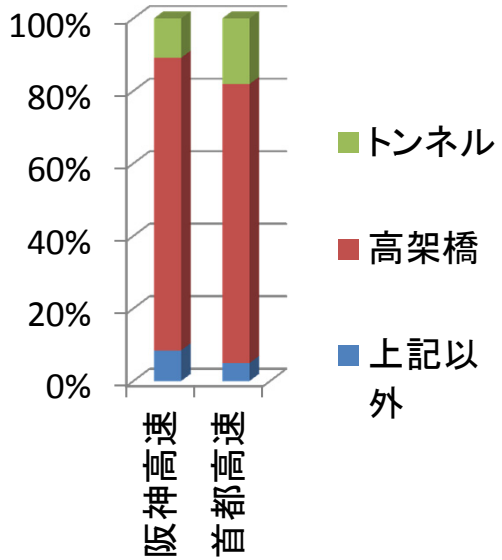




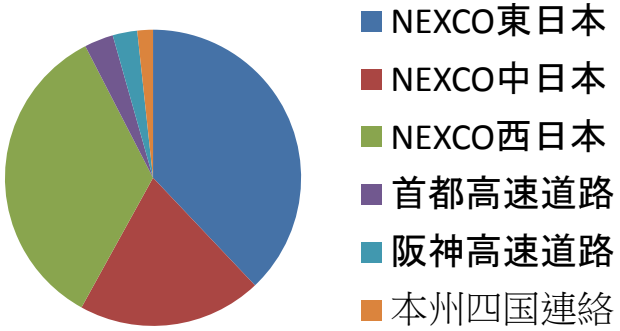
国土交通省　道路統計年報2014(H27.4.1)より作成

高速道路

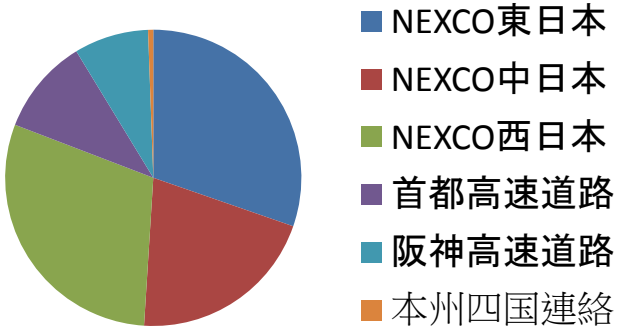
事業者	路線長 [km]	利用台数 [10^3台/日]
NEXCO東日本	3,831	2,734
NEXCO中日本	2,007	1,866
NEXCO西日本	3,453	2,710
首都高速道路	311	944
阪神高速道路	259	734
本州四国連絡	173	51
その他都市高速	206	635
合計	10,159	22,706



路線長



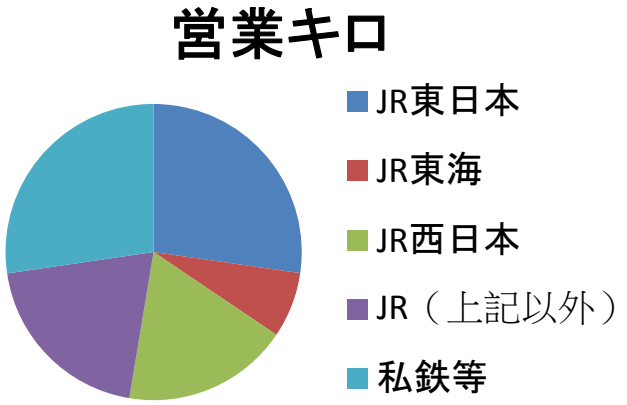
利用台数

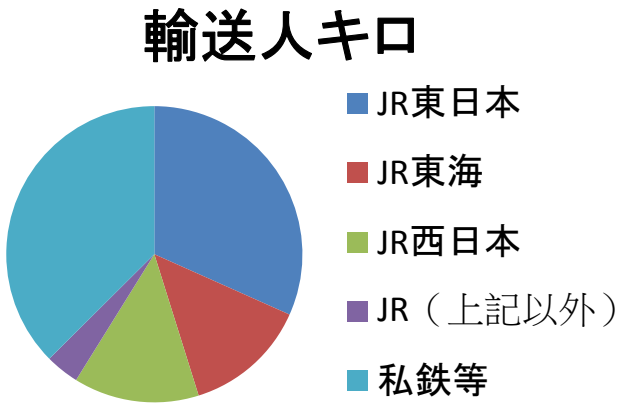


各社公表資料より作成

鉄道

事業者	営業キロ [km]	輸送人員　[10^6人]	輸送人キロ[10^6人km]
JR東日本	7,512.6	6,038	125 ,064
JR東海	1,970.8	515	53,255
JR西日本	5,012.7	1,798	54,118
JR(上記以外)	5,528.0	483	14,504
私鉄・公営など	7,518.7	13,868	147,885
合計	27,642.8	22,706	394,827





各社公表資料より作成

地震と技術基準の経緯(1995年まで)

年	主要な地震	技術基準	耐震設計に関する主要な変更
1923	関東地震	1926年(T15)道路構造に関する細則案	・耐震規定の導入（最強地震力を考慮する） ・震度法による耐震計算
		1939年(S14) 鋼道路橋設計示方書(案)	・設計震度の標準化
1952	十勝沖地震	1956年(S31) 鋼道路橋設計示方書	・地域、地盤条件に応じた設計震度の導入
1964	新潟地震	1971年(S46)道路橋耐震設計指針	・修正震度法の導入 ・落橋防止構造の導入 ・地盤の液状化の影響を考慮
1978	宮城県沖地震	1980年(S55)道路橋設計示方書	・地震時変形性能の照査法 ・主鉄筋段落し部規定の導入 ・動的解析の位置付けを行い設計地震入力規定
		1990年(H2)道路橋設計示方書V耐震設計編	・震度法と修正震度法を統合 ・地震時保有水平耐力法 ・動的解析による照査

地震と技術基準の経緯(1995年以降）

年	主要な地震	技術基準	耐震設計に関する主要な変更
1995	兵庫県南部地震	1995年兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様	・神戸の実測地震記録に基づく動的解析 ・免震設計の本格的採用 ・地震時保有水平耐力の照査
		1996年(H8)道路橋設計示方書	・タイプⅡ地震動の導入 ・免震設計の導入 ・落橋防止システムの充実 ・流動化を考慮した基礎設計法 ・地震時保有水平耐力法
		1998年(H10)鉄道構造物等設計標準（耐震設計）	・L1/L2地震 ・弾塑性／耐震性能に基づく設計 ・地震時列車走行性と変位制限
2002		2002年(H14)道路橋設計示方書 V耐震設計編	・性能規定型設計
2004	新潟県中越地震		
2011	東北地方太平洋沖地震	2012年(H24年)道路橋設計示方書 V耐震設計編	・橋の計画時の検討事項、津波への言及 ・設計地震動の見直し ・各種規定の見直し ー許容値、耐震性能照査法、遊間・伸縮装置・支承の規定、落橋防止システム
		2012年(H24)鉄道構造物等設計標準（耐震設計）	・性能照査型設計　　・地震動の見直し ・応答値算定法の改定 ・地震随伴現象の配慮

兵庫県南部地震(1995年)

発生時刻

1995年1月17日5時46分

震源地

淡路島北部

マグニチュード

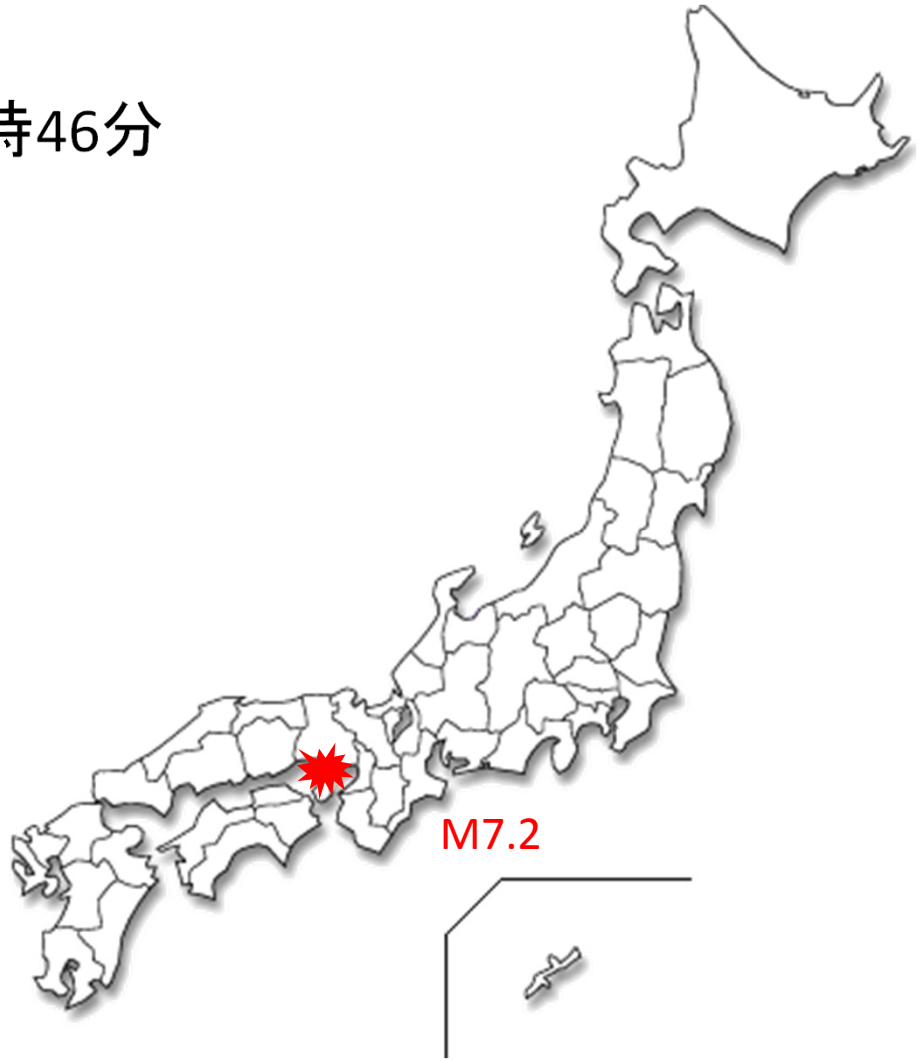
７．３

各地の震度

神戸 ６

豊岡 ５

姫路 ４



1995年　兵庫県南部地震による被害

- 犠牲者数：6,434名
- 負傷者：43,792名
- 社会基盤／交通施設の大被害
  - 鉄道：JR西日本（山陽新幹線含む）、阪急電鉄、阪神電鉄等合計13社に被害または運行に影響
  - 港湾：兵庫県、大阪府、徳島県の24港に被害．特に神戸港が甚大
  - 道路：中国自動車道、阪神高速神戸線、湾岸線、国道2、43号線等の主幹線道の寸断








HITACHI



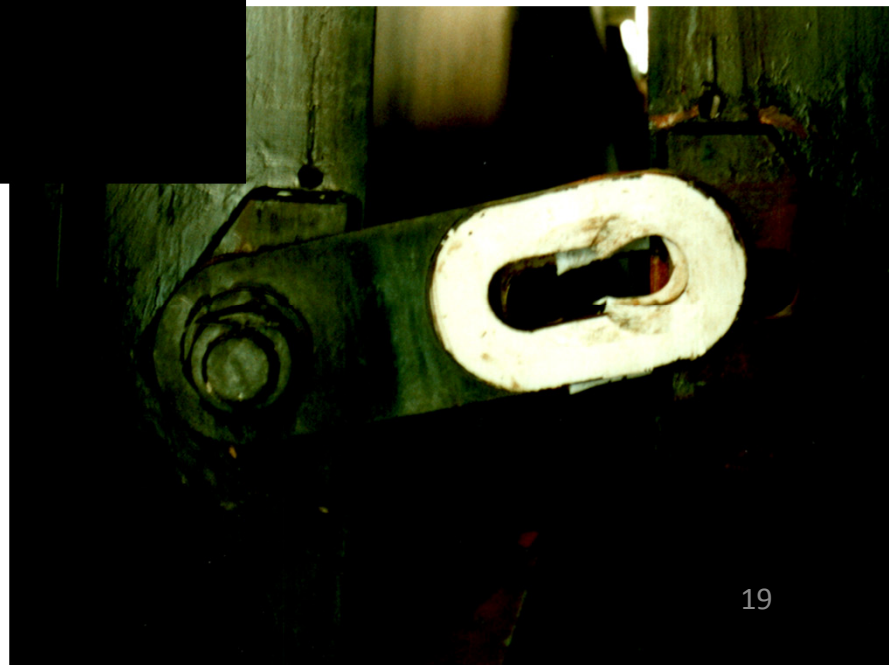





神 56


60


















62
63

交通施設被害の波及

- 新幹線：新大阪～姫路間（92km）が長期間不通．約11万人/日の影響．山陽新幹線（623km）の１日平均輸送人員約16万人の71%に相当
- JR在来線・私鉄等：JR東海道・山陽本線尼崎～姫路間（80km）、阪急電鉄神戸線全線（32km）、阪神電鉄本線全線（32km）など合計約419km、約580万人に影響
- 長期不通区間：JR東海道本線（芦屋～神戸間、14km）、阪急電鉄神戸線（西宮北口～三宮間、17km）、阪神電鉄本線（青木～元町間、10km）、合計約93km・約250万人（同年1月末)に影響
- 鉄道全体での影響：近畿圏内の約17%、全国の約４%の利用者数
- 地震直後の道路の寸断等によるトラック輸送の遅延等：約55万トン/日（全国のトラック貨物輸送量約3.5%に相当）

平成7年度運輸白書より

地震工学・地震防災に与えた影響

- 各種構造物の耐震設計法の見直し／改訂
- 耐震補強
- ソフト的防災・総合的防災の重要性の認識
- 被災経験とその教訓が、現在の都市地震防災対策検討にあたっての基礎

耐震設計の基本要素

4つの要素

- 入力
  - どんな地震が予想される？
- 目標性能
  - 予想された地震に対して、構造物はどうなるべき？

↑様々な意味合い

- 応答評価
  - 予想された地震で、構造物はどうなる？
- 設計
  - その目標性能を達成するためには、具体的にどんな材料・構造や寸法にして作るべきか？

※互いに少しづつオーバーラップする

構造物と地震力

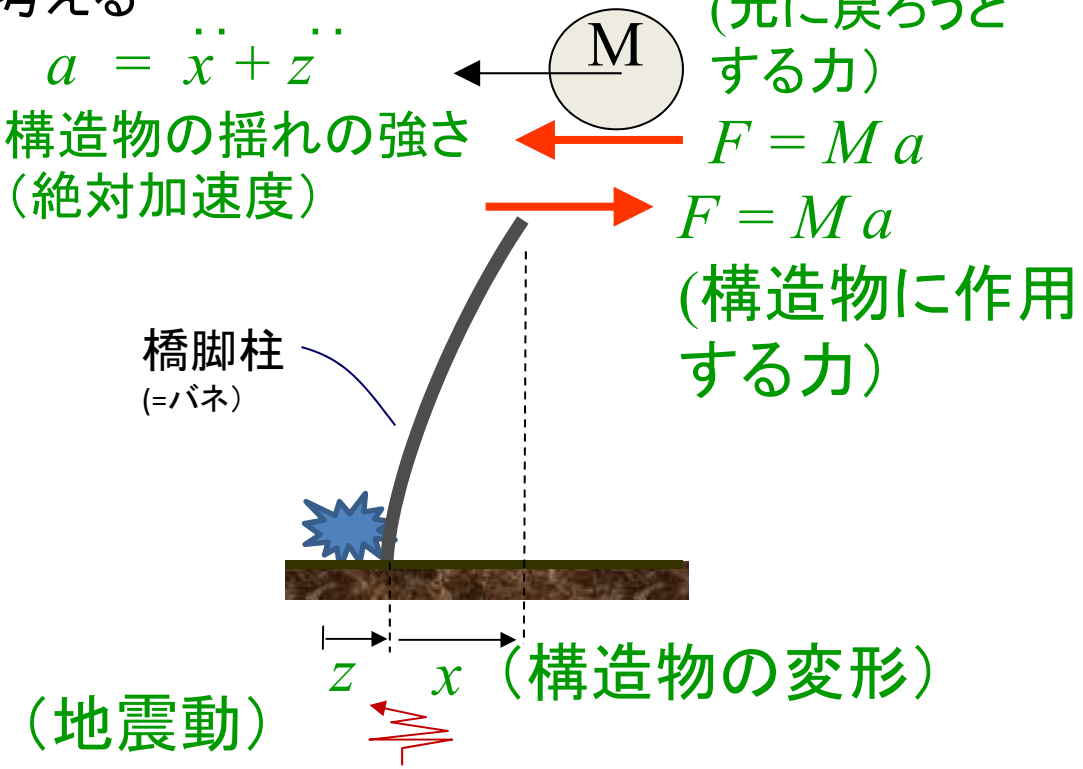
- どのような考え方で耐震設計をしている？



まず、地震で振動するバネとおもりに置き換えて考える

$a = \ddot{x} + \ddot{z}$

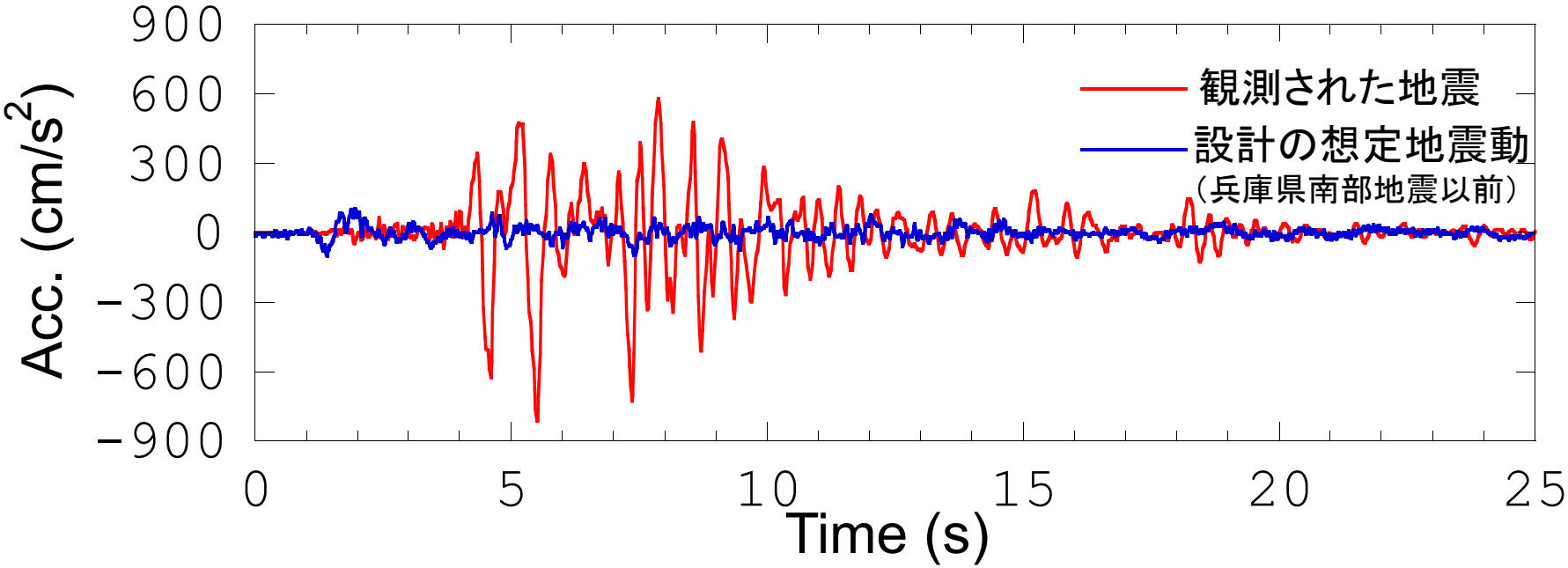
構造物の揺れの強さ（絶対加速度）



構造物に作用する力の最大値＝
質量×揺れの加速度の最大値

地震動

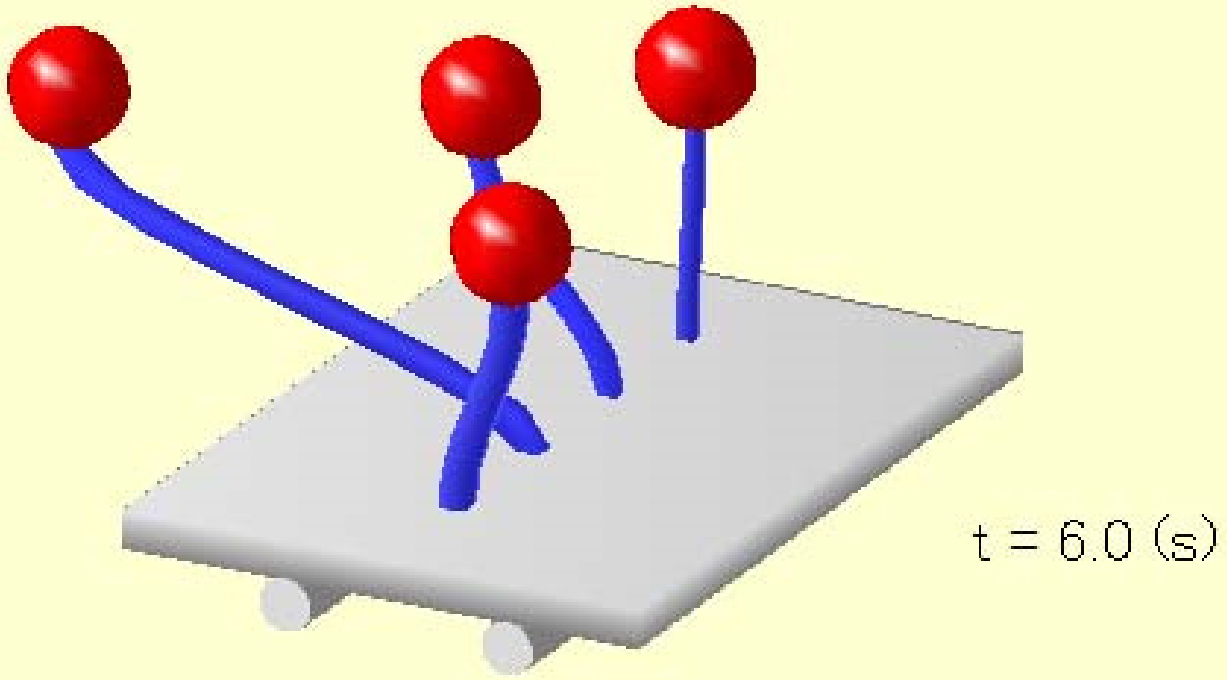
- 仮定された地震（入力）と、実際の地震による作用の強さの関係



- 実際に来る地震の強さは、小さいものから大きいものの間で様々あり得る．事前には一つの強さに確定できない
- 構造物がどうなるかを予想するためには、対応する状態の中で、不確定な要因を考慮して予測される最も強い地震を仮定する（設計地震動）

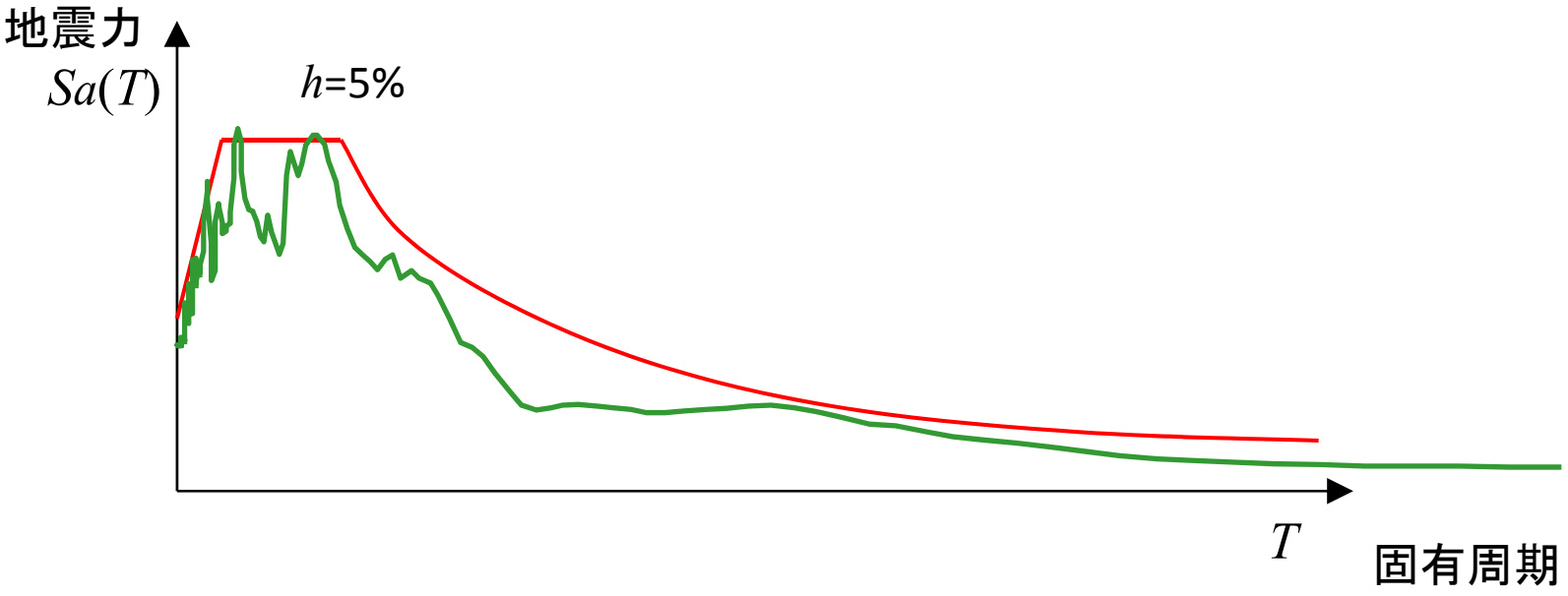
地震動の作用の例

- シミュレーション



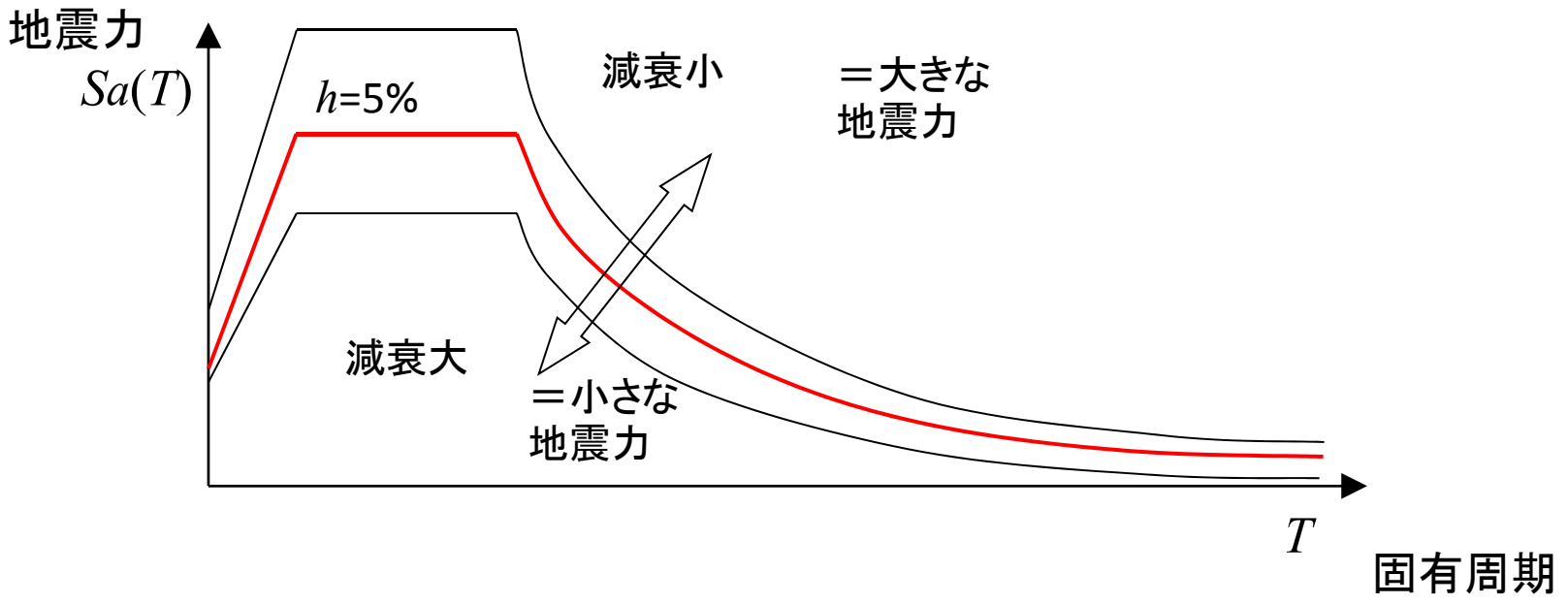
地震力の性質（固有周期との関係）

- 構造物に作用する地震力の大きさは、同じ地震動であっても構造物の固有周期によって変化する。
- （一般的な傾向）固有周期が長くなるとある程度までは地震力は増加するが、より固有周期が長い場合は固有周期が長くなるほど地震力は減少する



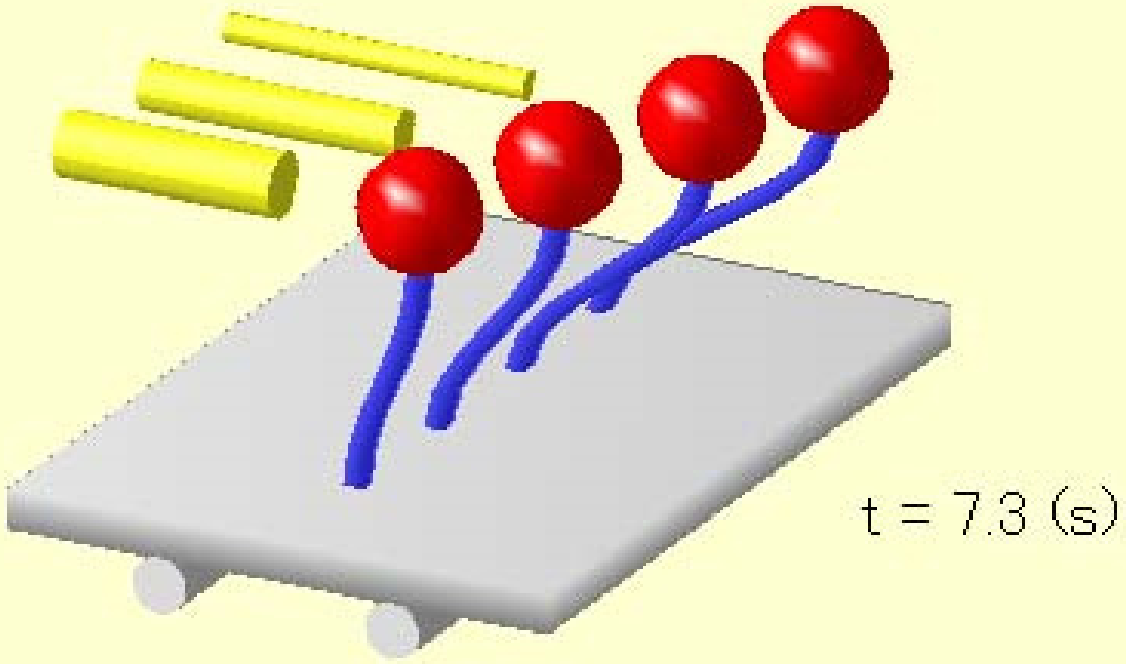
地震力の性質（減衰との関係）

- 構造物に作用する地震力の大きさは、同じ地震動であっても構造物の持つ減衰によって変化する。
- 減衰大→地震力小



減衰による地震作用の相違の例

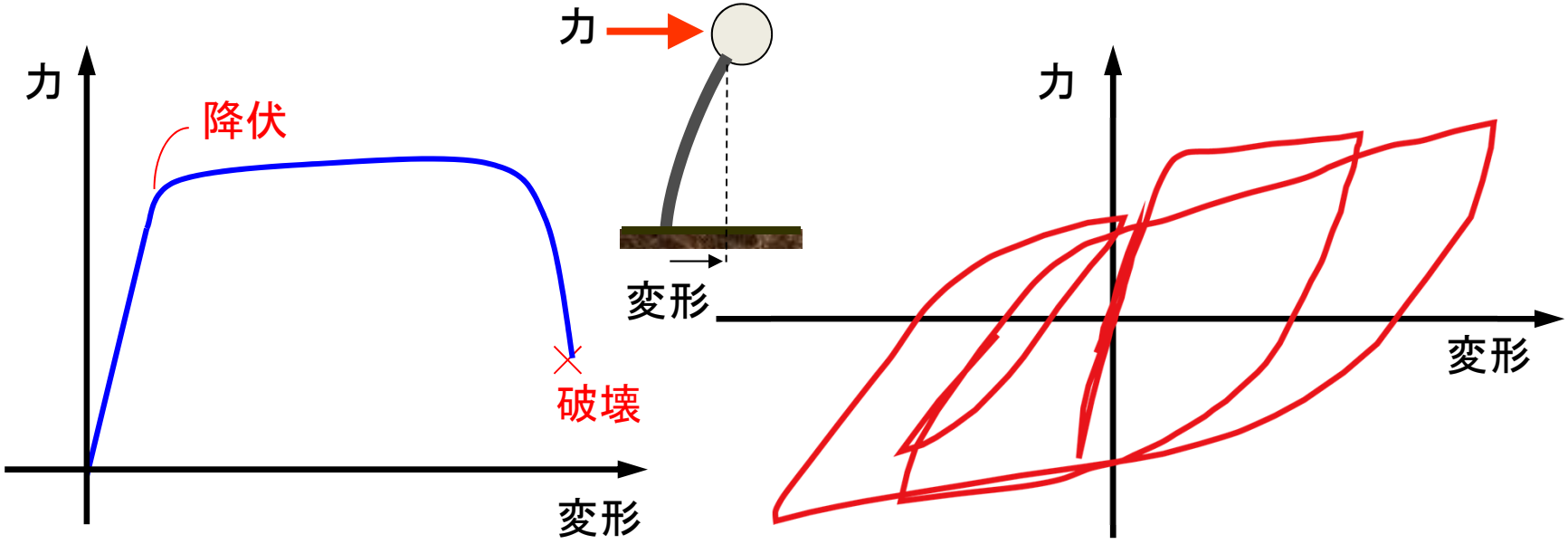
- シミュレーション



構造物の損傷に伴う挙動(弾塑性)

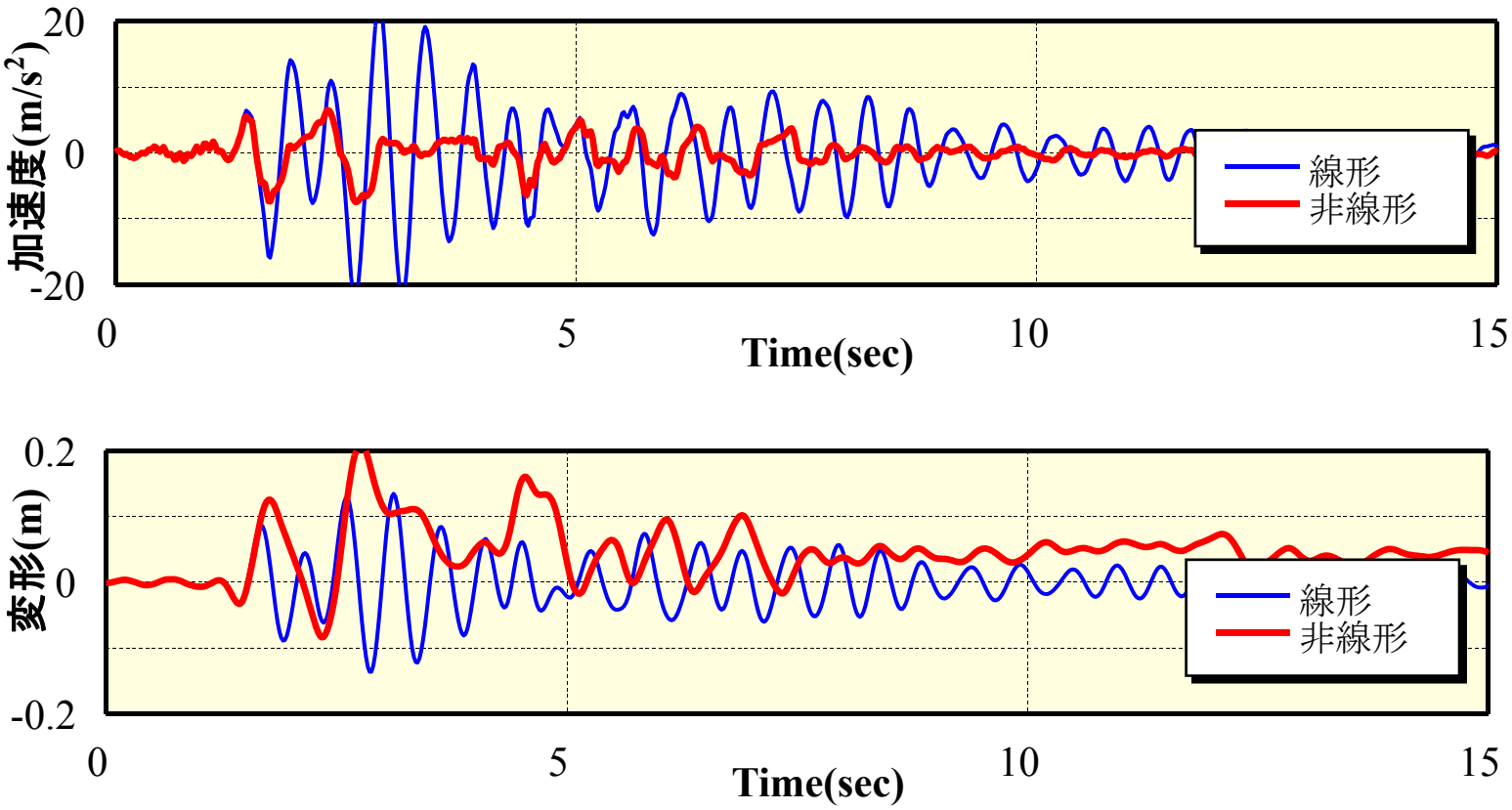
構造物の建設に使われる鋼や鉄筋コンクリート部材は、以下のような性質を持つ

- 小さな変形振幅の範囲では、力と変形は比例関係(今までの前提)　弾性
- しかし、ある限度を超えた力が作用すると、力が増えなくとも変形だけ進む．この時、構造物は損傷を受けている　塑性・弾塑性
- 地震の時のように、繰返し交互に逆の方向に変形すると、力と変形の関係は、ある領域を囲むように回るような挙動を示す　履歴復元力



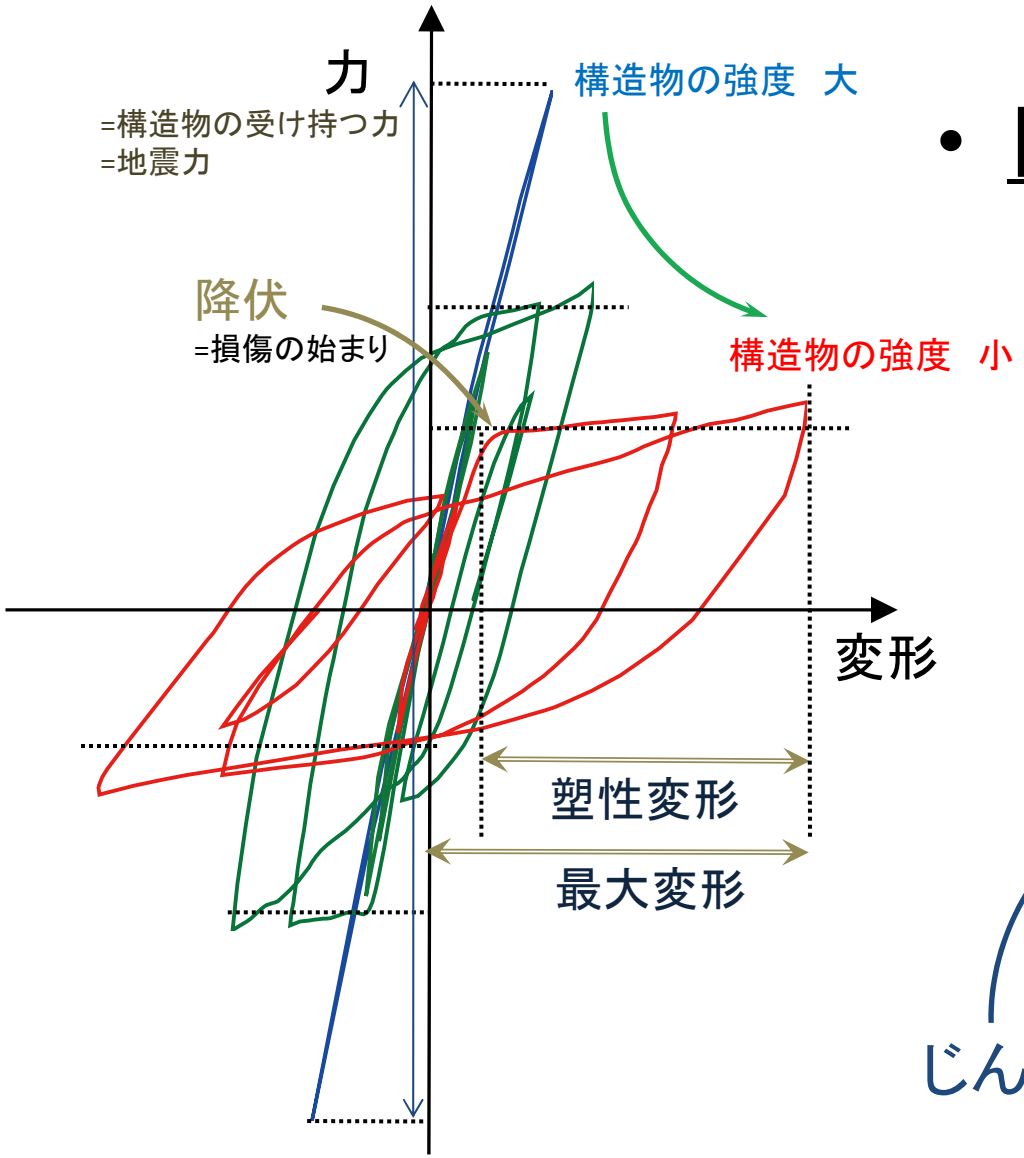
変形－力関係(変形を単調増加)　　変形－力関係(繰返し変形の場合)

弾塑性構造物の揺れ方



- 弾塑性の場合、変形が大きくなる
- 弾塑性の場合、加速度が小さくなる (= 力が小さくなる)

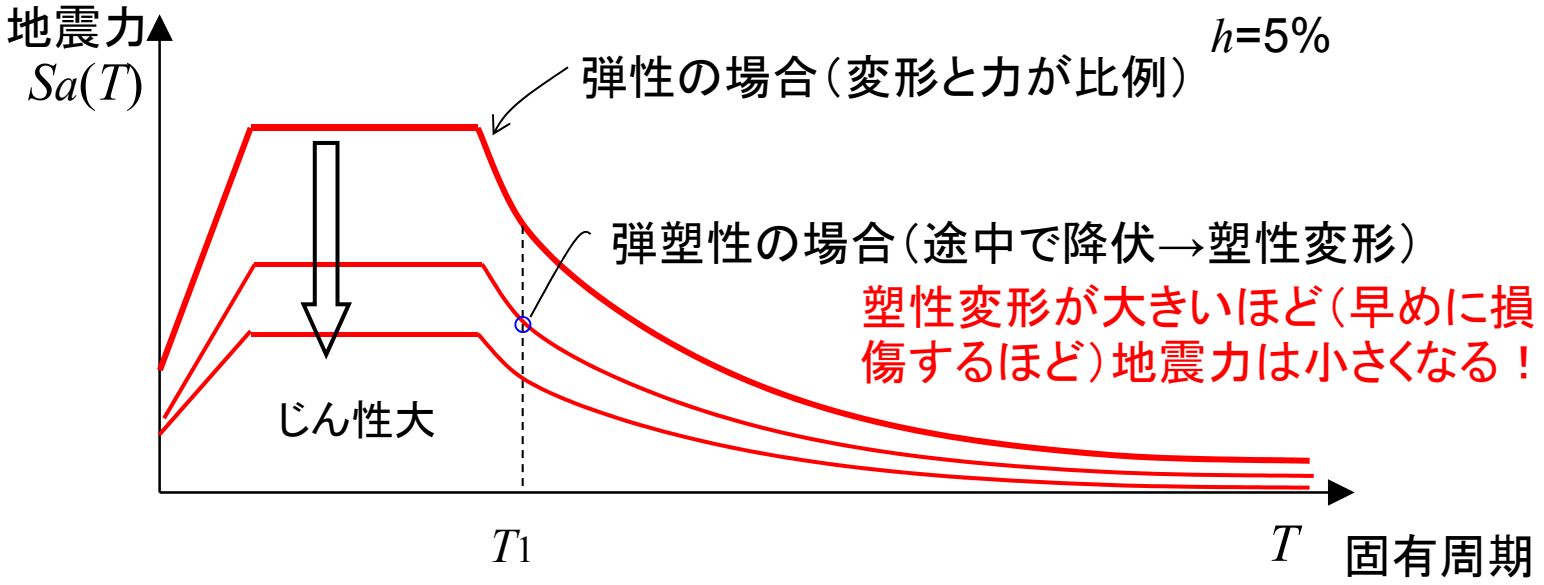
塑性変形の割合vs地震力



- 同じ地震であっても:
  - 強度が低いほど、塑性変形の割合が大きい
  - 可能な塑性変形の割合が大きいほど、構造物の強度を小さくしても良い
  - 可能な塑性変形の割合が大きいほど、地震力を小さく考えてよい

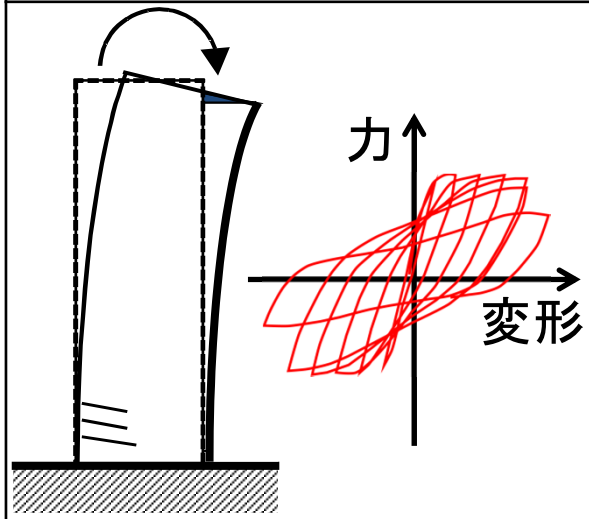
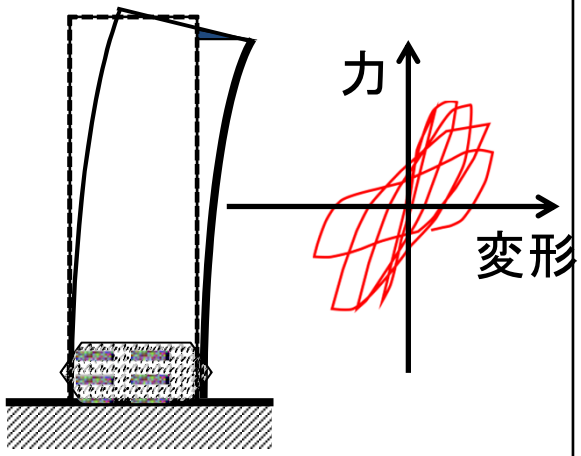
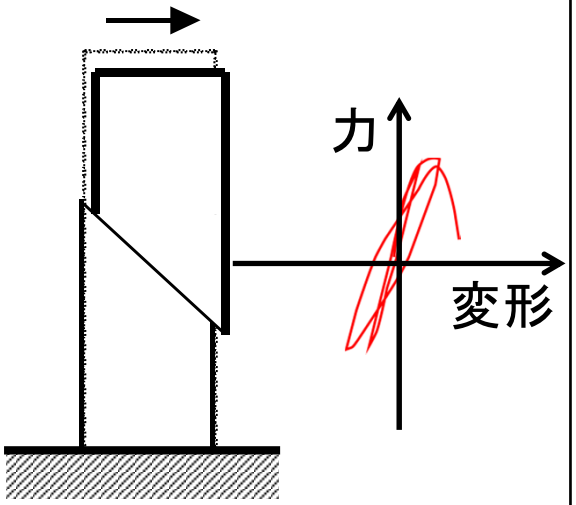
じん性／「ねばり」

地震力の性質（塑性化との関係）



- 降伏の後の塑性変形できる能力（じん性）に応じて、損傷せずに構造物が耐えられる力（強度）を小さく設計できる

構造物の損傷の形態と「じん性」（鉄筋コンクリート橋脚の例）

曲げ損傷（じん性　大）	曲げ破壊（じん性　小）	せん断破壊（じん性　乏）
		
横鉄筋を十分に配置・適切に定着する等で ・十分なコンクリート拘束効果 ・主鉄筋の切断・座屈などが早期に生じない	・コンクリート拘束効果が不足 ・主鉄筋の座屈等が早期に生じる ・主鉄筋の段落し ・鉄筋の定着不足	・横鉄筋が不足 ・アスペクト比が低く、せん断力と曲げモーメントの比が大きい

耐震設計の考え方－２段階設計法 (1)

- 現実：地震にはいろいろな大きさのものが異なった頻度で発生する
- 設計で考える地震：２種類の大きさの地震を考える。それぞれレベル１地震動・レベル２地震動と呼ぶ
  - レベル１地震動：構造物の建設地点で設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動．　“大きな地震”
  - レベル２地震動：構造物の建設地点で考えられる想定される最大級の地震動．　“極端に大きな地震”（「起こる確率は低いが大きな地震」「数百年に一度の」などでの定義もある）

耐震設計の考え方－２段階設計法 (2)

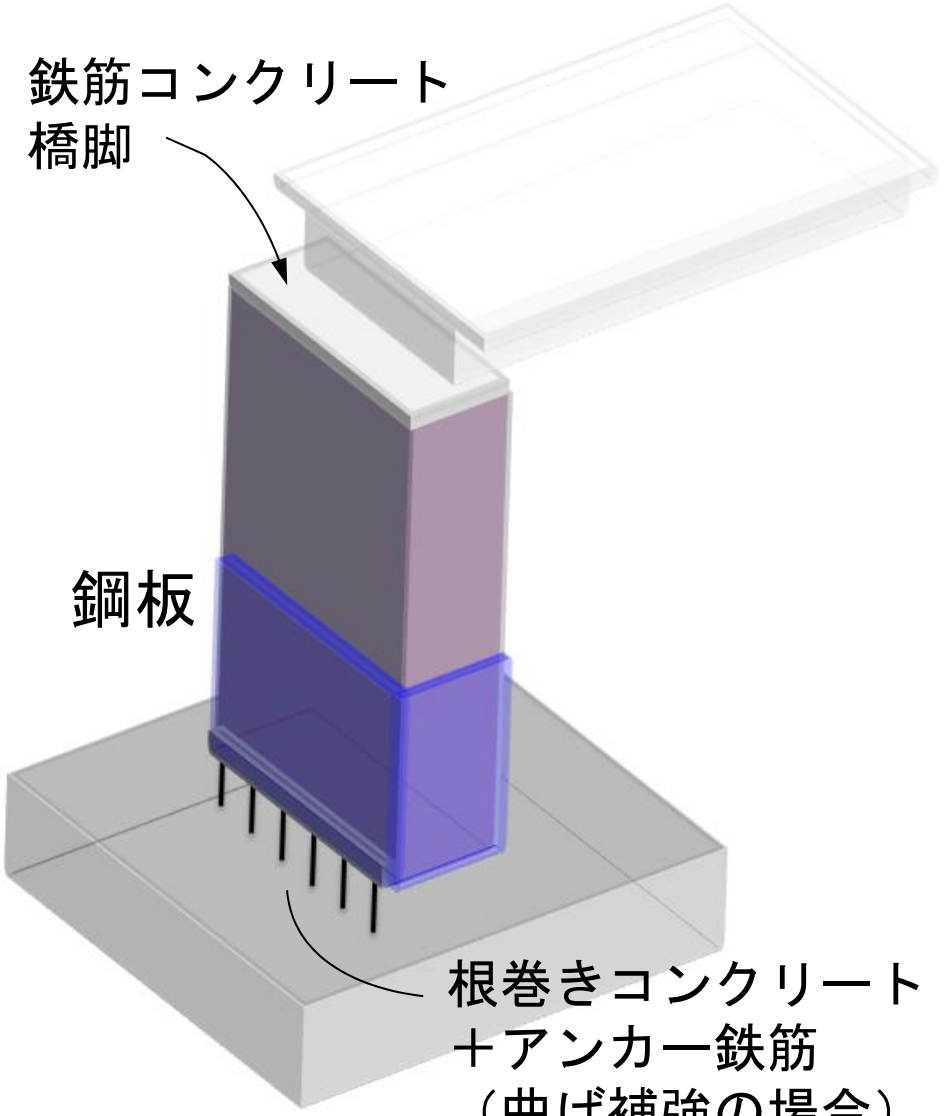
- 構造物の目標性能：構造物に応じてそれぞれのレベルに対して決める．道路橋の場合の例
  - レベル１地震動：「地震によって橋としての健全性を損なわない」
  - レベル２地震動：「地震による損傷が橋として致命的にならない」
- 敢えて分かりやすい表現を試みれば、レベル１地震動に対して「壊れない」、レベル２地震動に対しては「崩壊せずすぐに修理できる」等がイメージできる

  →「構造物は、極端に大きな地震時に少し壊れても良い」が前提
- レベル１地震動に対しては、地震後の機能も考慮
- レベル２地震動に対しては、復旧性も考慮される．損傷する／しないのほか、損傷の程度を考える．

既に作られている構造物の地震対策 ー耐震補強

- 耐震設計法の考え方で、目標を満足しない古い構造物があったら？　→満足するように構造物に変更を加える＝耐震補強
- 工法
  - 耐力（強度）・じん性を増加する工法
  - 免震
  - 制振装置の付加
- 民間／公的機関等での活発な技術開発
  - コスト低減
  - 施工の容易さ、適用可能範囲の拡大

鋼板巻立て工法



- 既設鉄筋コンクリート橋脚の覆うように鋼板を設置
- 効果
  - せん断耐力の増強
  - じん性の向上
- 基礎への作用力を増加させたくない場合は鋼板下端とフーチングの間に隙間を空ける手法も

鋼板巻立て工法の例





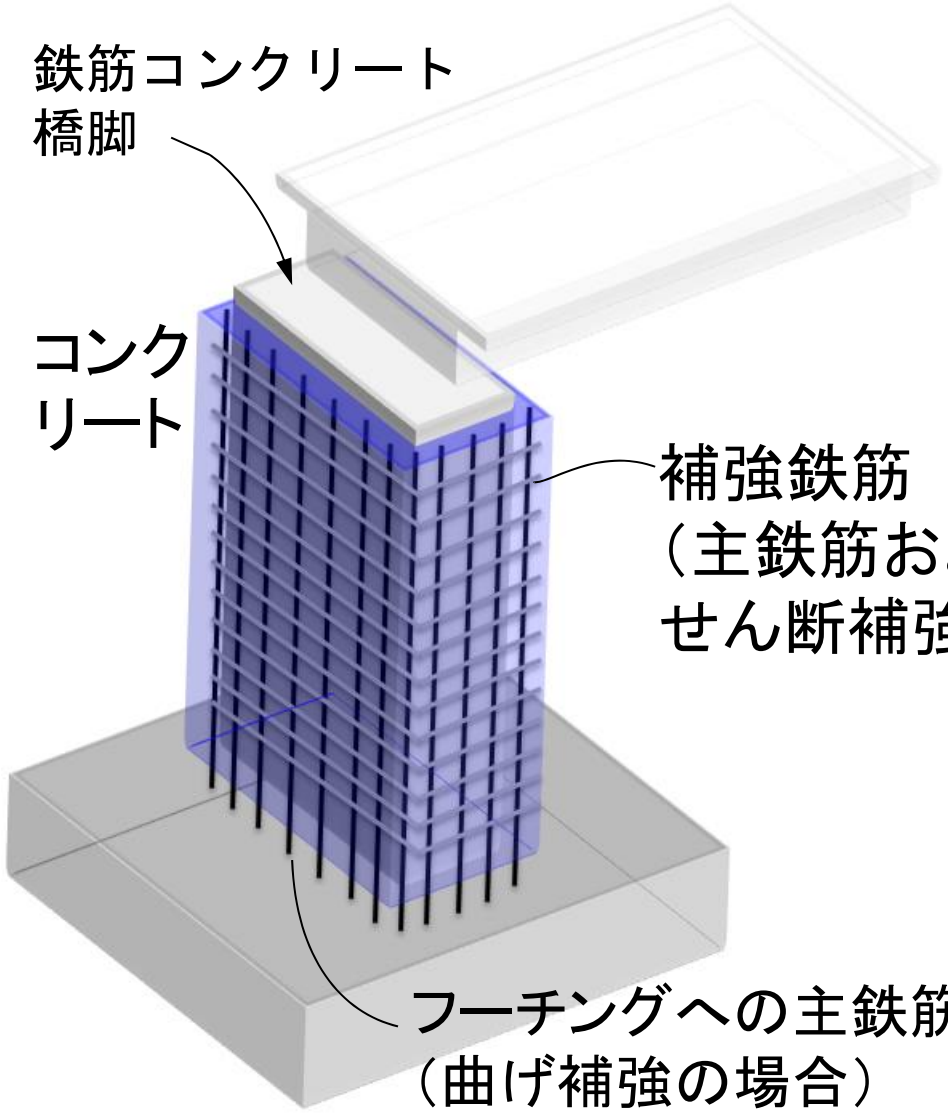


技術開発による種々のバリエーション

- 鋼製パネル工法
- RB（リブバー）補強工法
- APAT工法（外部スパイラル鋼線巻立工法）

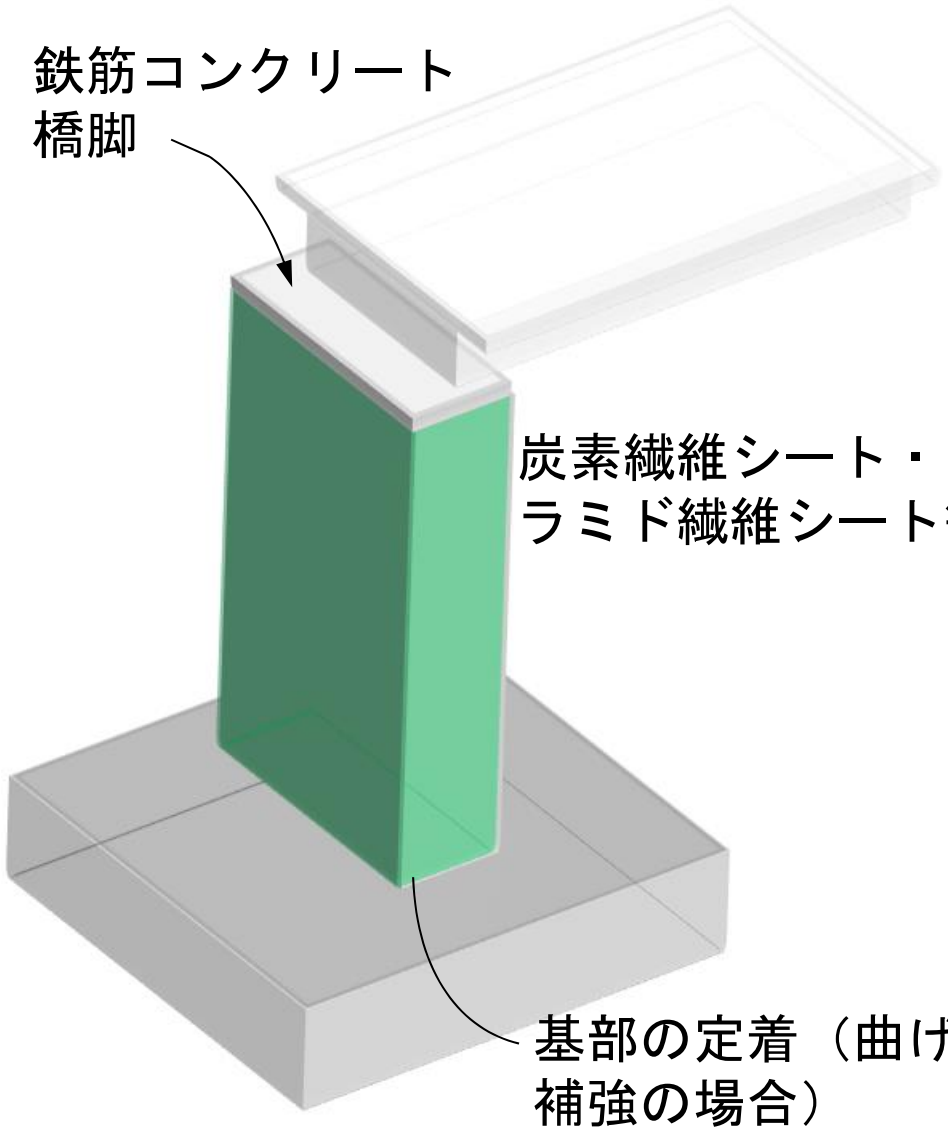
など

RC巻立て工法



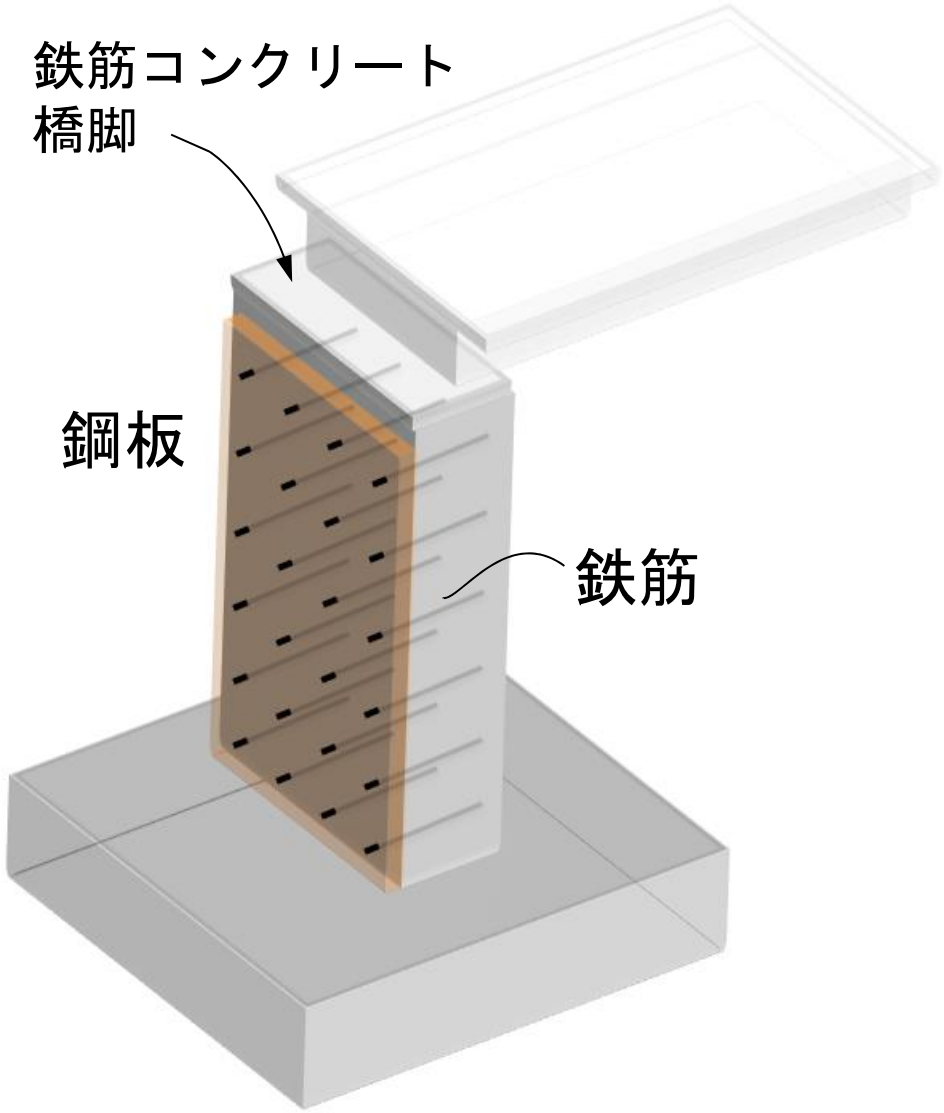
- 既設橋脚表面周囲に鉄筋とコンクリートを設置
- 効果
  - せん断耐力の増強
  - じん性の向上
- コスト面で有利、実際の耐震補強工法の主流

繊維巻立て工法



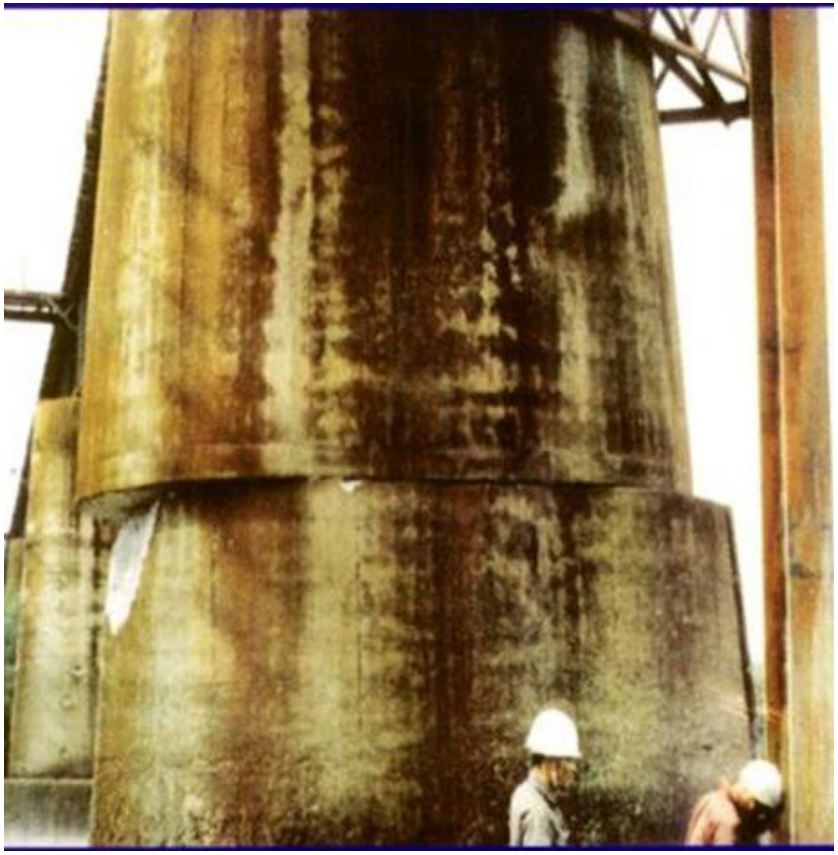
- 既設橋脚表面周囲に繊維シートを接着剤などで貼り付け
- 効果
  - せん断耐力の向上
  - 曲げ耐力の向上
  - じん性の向上
- 特長
- スペースの制限、工事に伴う騒音を避けたい、橋脚の重量増を避けたい場合、河積阻害率が増やせない場合　など

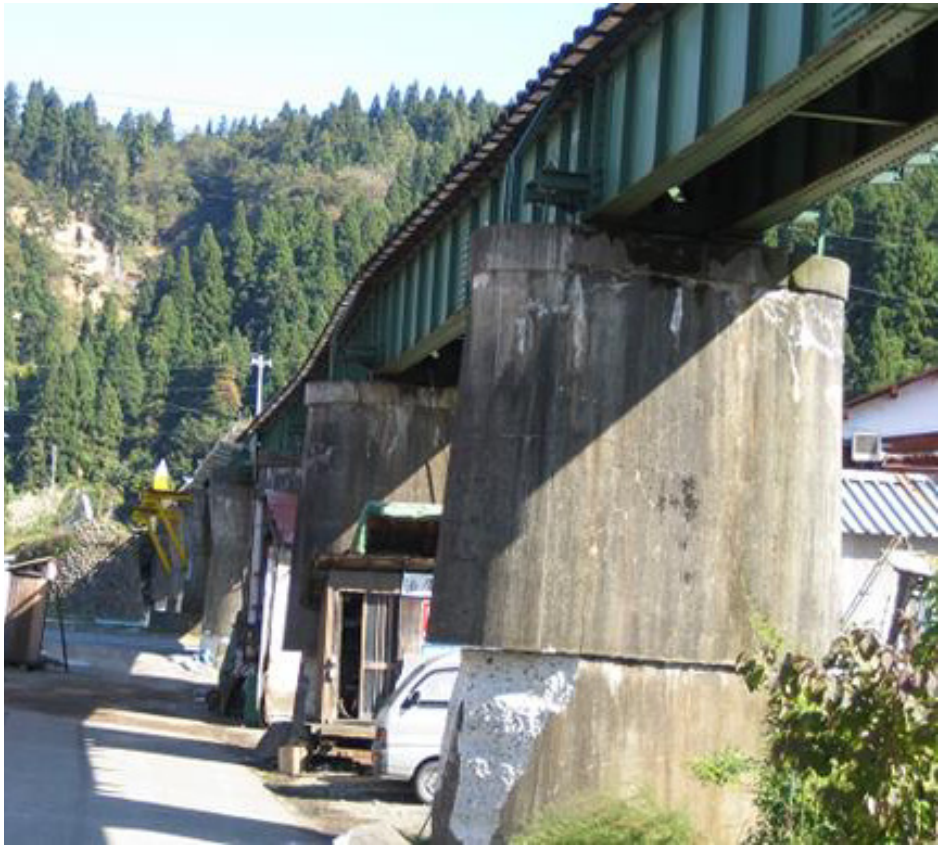
一面せん断工法



- 削孔して挿入した鉄筋を樹脂で橋柱に固定
- 効果
  - せん断耐力の増強
- 空間的制約が大きい場合に有効
- 適用コスト低

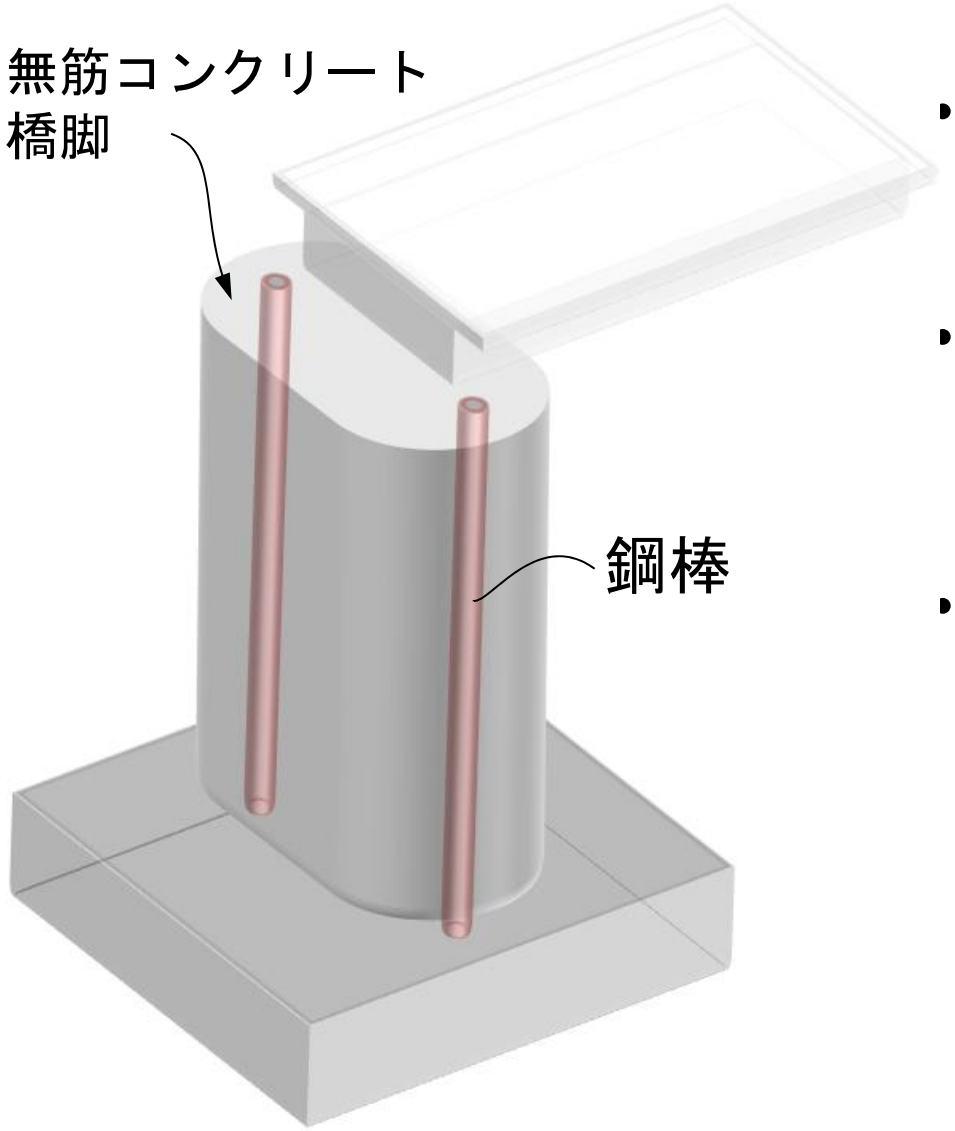
無筋コンクリート橋脚の損傷





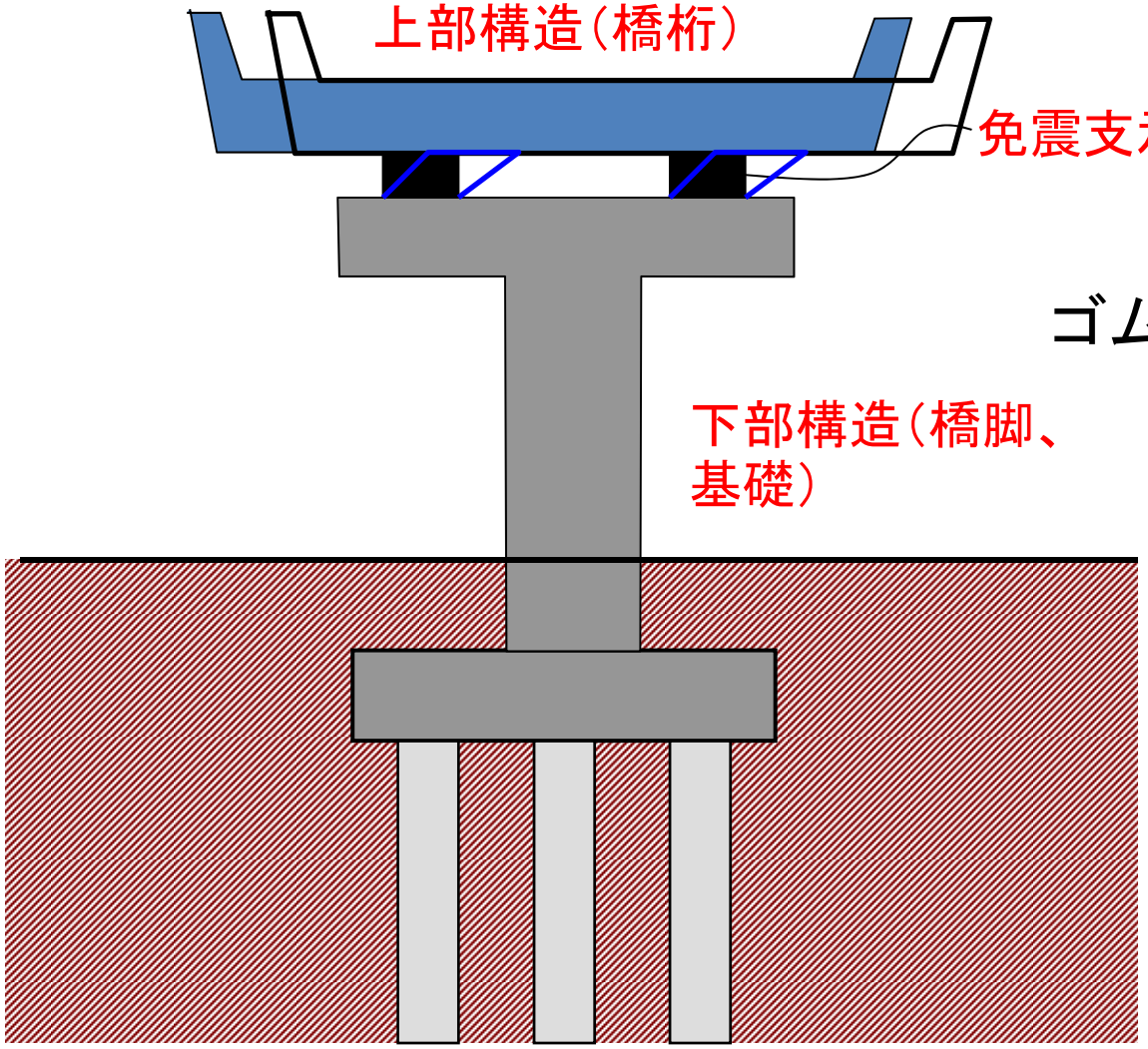
- コンクリート打設時の水平打継ぎ目でのずれ

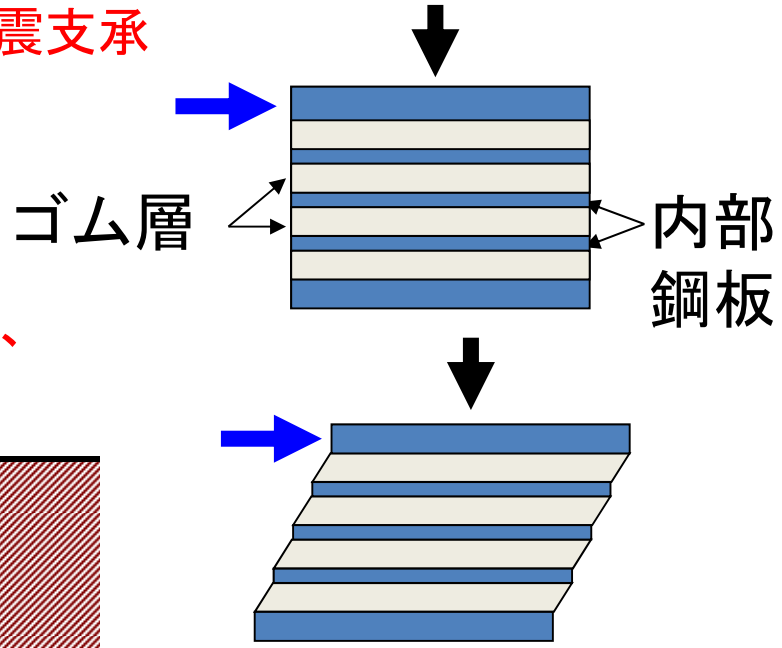
鋼棒挿入工法



- コンクリート橋脚上面から鉛直に穴を空け，鋼棒を挿入しモルタルで固定
- 効果
  - 地震時にコンクリートの打継目のずれを止め、損傷への抵抗力を向上
- 通常のRC巻立て工法との比較
  - 河川内橋脚の場合：河積阻害率増加せず、締切工なしで施工可能／施工時期の制約小
  - 仮設が小規模で経済的

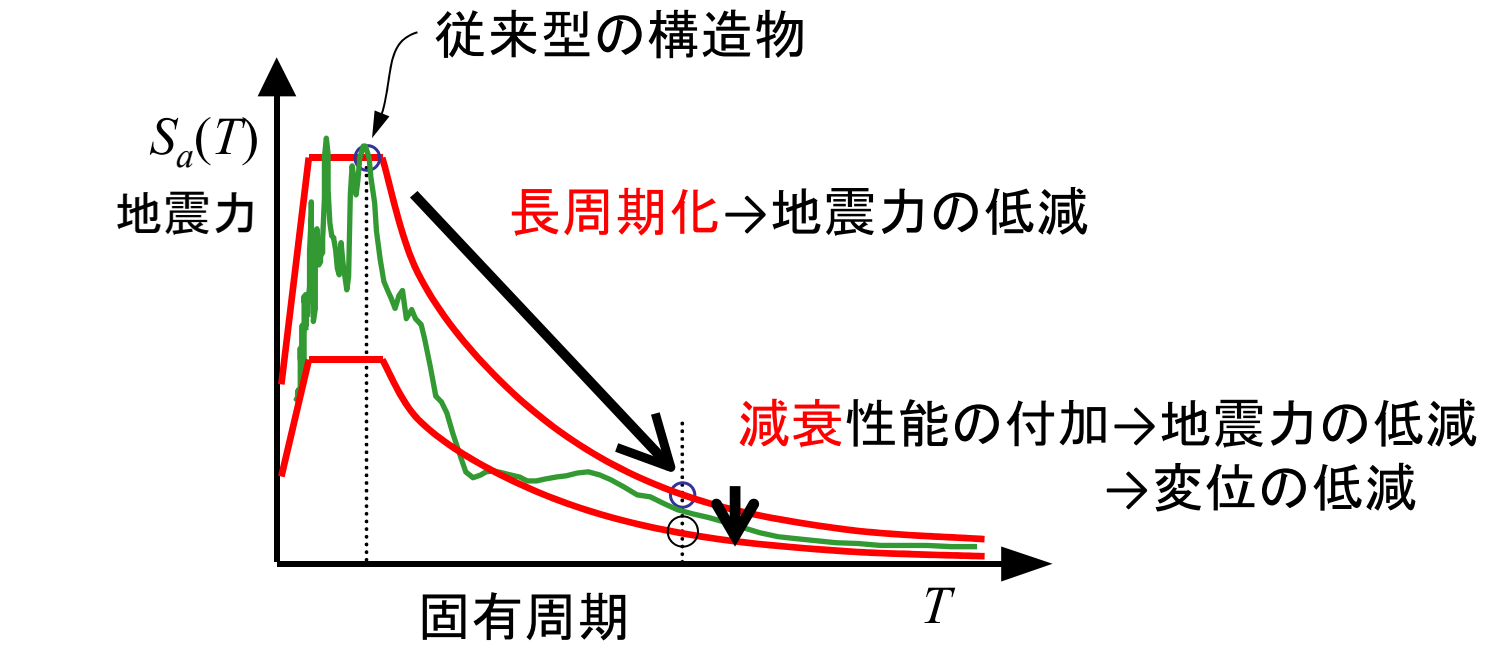
免震





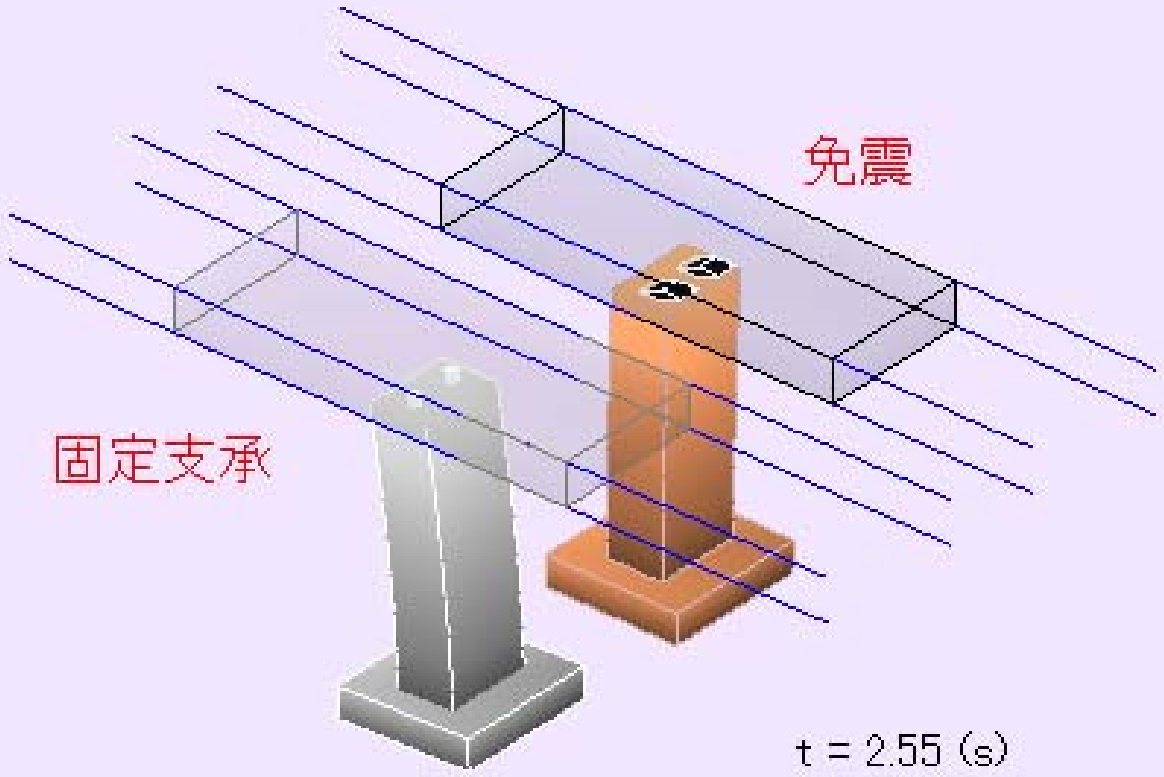
免震支承（ゴム支承）

免震の原理

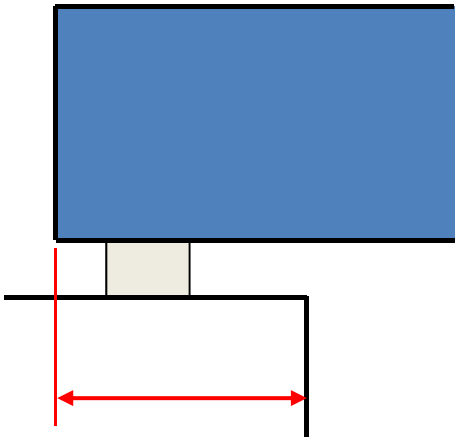

従来型の構造物
$S_a(T)$
地震力
長周期化→地震力の低減
減衰性能の付加→地震力の低減
→変位の低減
固有周期
T
堅い構造
=“短周期”
柔らかい構造
=“長周期”

免震の効果の例

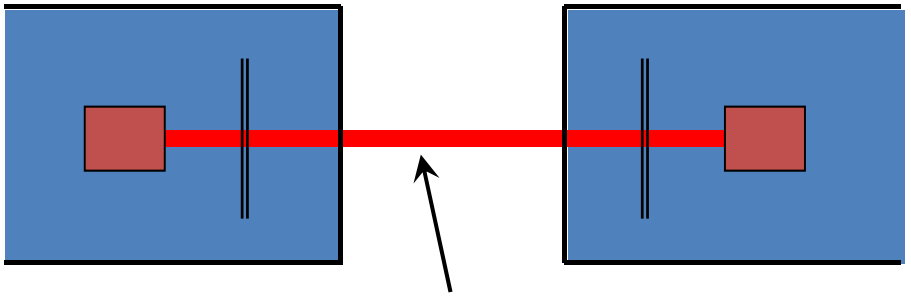
- シミュレーション



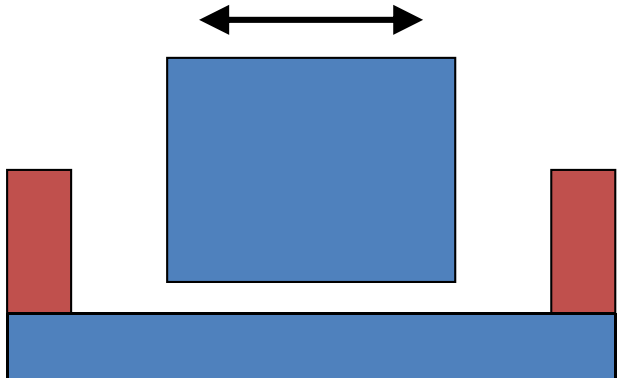
地震時の桁変位に対する対策



十分な桁かかり長（橋桁が橋脚の上に乗っている長さ）の確保

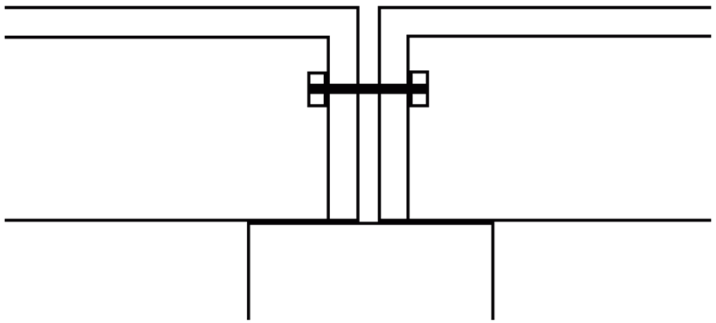


落橋防止装置の追加（ケーブル、チェーンなど）



過大変位を防ぐ
ストッパ／変位制限構造の設置
（落橋防止システム）

落橋防止装置









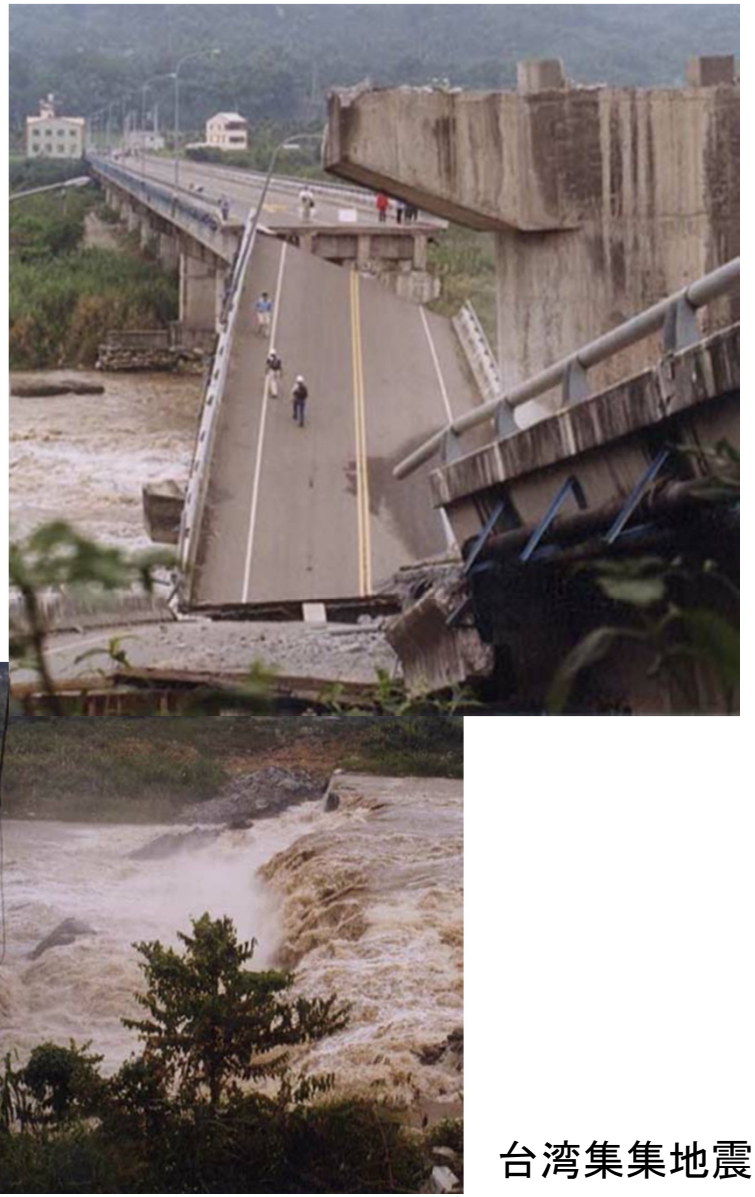
津波に対する対策



- 未解明な部分が多く，設計手法は未確立
- 性能を定めて照査をする対象となっていない
- 構造計画での配慮
  - 津波の高さに対して桁下空間を確保
  - 津波の影響を受けにくいような構造的工夫や構造形式
  - 上部構造が流出しても復旧しやすい構造的配慮
  - 国や地域の防災計画等を参考に影響を大きく受けない路線計画

東北地方太平洋沖地震(2011年)
東北地方整備局より

断層変位に対する対策



台湾集集地震(1999年)

- 未解明な部分が多く，設計手法は未確立
- 性能を定めて照査をする対象となっていない
- 構造計画での配慮（鉄道設計標準）
  - 断層調査結果等を参考に影響を受けないように路線計画
  - 活断層と交差の場合は、断層方向とできるだけ直交
  - 断層交差角度に応じた落橋防止対策
  - 山岳トンネル：断層の前後区間でのインバート設置，覆工（短繊維混入や鉄筋コンクリート）
    土構造物等：中実構造

レジリエンス

- 定義：概ね「想定外の事態への対応」、「復旧性」の重視などが共通項 （現状では定義にやや幅あり）
- これまで述べた地震対策とはどのような関係？
- 定義の例：4つの段階
  1. システムの防護
  2. 防護範囲を超えてシステムが損傷してもサービスを継続
  3. サービスが中断しても、その影響範囲を限定
  4. サービスが中断しても、早期に復旧

交通施設とレジリエンス(1)

- 交通施設のサービス＝利用者に「A地点→B地点への移動手段を提供すること」
- これまでの耐震性の確保・向上策は、第一段階の「防護」に対応.
- 耐震設計や耐震補強などは、この側面.
- 免震や制震などの技術は、これをより大きな地震動のレベルの範囲まで広げる方向の技術と考えられる

交通施設とレジリエンス(2)

- 「損傷してもサービスの継続」は実現可能？
- 施設や路線区間単体で見れば、あるレベル以上の極端に強い地震動では、損傷を許容し（実質上）サービスは中断せざるを得ない.るというのが現在の（二段階設計法での）考え方
- ネットワーク構造による代替経路や迂回路の提供など、リダンダンシー（冗長性）の確保がこれに対応すると考えられる

交通施設とレジリエンス(3)

- 「サービスが中断しても、影響範囲を限定」は、構造計画などに相当
- 鉄道構造物の設計に導入された「危機耐性」
- 「サービスが中断しても、早期に復旧」は、これまでの復旧性への考慮．しかし、それ以前の影響範囲の限定などがあることが前提
- 地震対策は、二段階設計法に準拠してレベル2地震動に対する要求性能が継続していくものと考えられる．しかしながら、将来的に「最大級の地震動（レベル2）に対してもサービスを提供する」ような技術の進展と実用化を目指すことを考えても良いのではないか